欧米主要国の原子力保全分野における AI 適用および開発例

Examples of AI Application and Development in Nuclear Power Plant Maintenance in the US and European Countries

日本エヌ･ユー･エス株式会社　鈴木　直道　Naomichi SUSUKI　Member

Nowadays, more and more technologies of AI including machine learning and deep learning are being developed. Using AI, we can automate recognition, prediction and implementation of something. Although introducing these technologies to the nuclear industry is difficult, it can be the best solution to solve problems we are facing such as plant efficiency and labor shortage. In the US and some European countries, they have already put AI into practice in the field of nuclear power plant maintenance as the automation of tasks of condition reports, the anomaly detection of components, making digital manuals and chatbot etc. In addition, some advanced researches, for example, monitoring fire, a hybrid AI and computational mechanics approach for the life estimation of components, quantifying the uncertainty and planning of actions during accidents, are being done. Finally, a Federal Register was published in April 2021 about NRC gathering information on the nuclear industry's state of developing and introducing AI.

Keywords: AI, machine learning, deep learning, maintenance, the US, Europe,

１．はじめに

総務省が公表した令和元年版情報通信白書[1]によれば、人工知能（AI：Artificial Intelligence）の明確な定義はなく、その定義は研究者によって様々である。しかし、一般的には、「人間の思考プロセスと同じような形で動作するプログラム、あるいは人間が知的と感じる情報処理・技術」といった広い概念で理解されている。

AI に関連し、「機械学習（ML：Machine Learning）」や「深層学習（DL：Deep Learning）」といった単語をよく耳にする。総務省令和元年版情報通信白書によれば、これら 3 つの関係を図 1 のように示している。

また、総務省が公表した平成 28 年版情報通信白書[2]によれば、図 2 に示すように、AI が実際のサービスにおいて果たす機能として、「識別」「予測」「実行」の 3 つが挙げられるとされている。

連絡先：鈴木　直道、susuki-nomc@janus.co.jp
日本エヌ・ユー・エス株式会社
〒160-0023 東京都新宿区西新宿 7-5-25
西新宿プライムスクエア 5 階

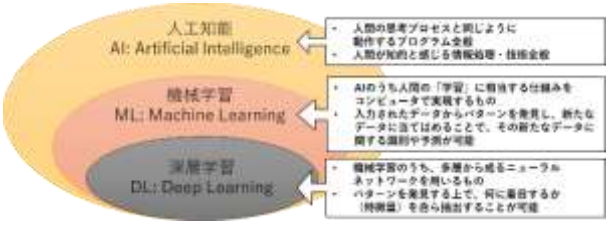

図 1　AI と機械学習および深層学習の関係

図 2　AI の機能

２．原子力保全分野への AI 適用例

米国や欧州では、すでに原子力発電所の保全分野で AI が活用されている。ここでは、米国および欧州主要国における原子力保全分野への AI の適用に関する良好事例を紹介する。

2.1 状態報告書に係る作業の自動化（米国）

Arizona Public Service 社は、機械学習を用いたソフトウェアを社内開発し、Palo Verde 発電所（PWR）における状態報告書に係る作業の一部を自動化した[3]。同社は、60 万ドルの開発資金を用意し、2017 年 1 月に社内の開発チームを立ち上げた。また、オープンソースのツールを積極的に用いることで迅速な開発を達成した。

ここで状態報告書（Condition Report）とは、通常と異なるプラント状態を発見した際に社内の全ての職員から出される報告書で、毎日膨大な件数が提出されておりそのスクリーニングに大きな手間がかかっていた。AI の適用によって、確認された事象への傾向コードの付与、重複している作業の検出、作業のスクリーニング、共通している原因の特定などを自動で実施できるようになり、年間数十万ドルのコスト削減に成功している。

2.2 機器の異常検知（米国）

Ameren 社は、Callaway 発電所（PWR）に 120 個以上のワイヤレスセンサーを導入し、オンラインモニタリングおよび状態監視保全を可能にした[4]。また、オンラインモニタリングにより収集したデータを OSIsoft 社の PI System™ を用いて分析することで、機器の熱的・機械的な異常を早期に発見することができるようになり、発電所全体のパフォーマンスが改善される。

ワイヤレスセンサーとデータ分析ソフトウェアの導入に約 36 万ドルの支出が生じたが、現在では手動でデータを収集する必要がなくなり、またプラントの運転停止を回避できたとして、約 100 万ドルのコスト削減を達成できたと見積もっている。

今後は得られたデータのパターン認識を行い、機器の熱的・機械的挙動を事前に予測することで、予防保全計画の支援を実施する予定である。

2.3 デジタルマニュアルの作成（仏国）

EDF 社は、AI を用いて発電所のデジタルレプリカを作成し、実際の機器と手順書内の機器を紐づけている[5]。レーザースキャンにより発電所内部のパノラマ画像を撮影し、画像認識に関する深層学習モデルを作成した。

認識結果例を図 3 に示す。画像の認識精度は約 80%であり、この自動化プロセスは、最先端のニューラルネットワークアーキテクチャの優れた性能を証明し、多くの一般的な機器（はしご、ケーブル、弁、配管など）に対する自動認識結果は良好だった。また精度を高めるため、一部手動でデータを調整することが検討されている。

同じ作業を人間が行った場合約 4 か月かかるが、本節で紹介した深層学習モデルの作成及びそれを用いたデジタルレプリカの作成は約 3 週間で完成した。

2.4 チャットボットの使用（英国）

英国 EDF 社の R&D チームは、チャットボット（人間をまねて自動的に会話を行うプログラム）を社内で利用し始めている[6]。同チームでは、チャットボットを使用し、社内システムへのログオン、ソフトウェアの変更のデプロイ、およびソフトウェアのバグの報告を自動化している。

3．原子力保全分野に関する AI 開発例

3.1 火災監視（米国）

機械学習による視覚的モニタリングでの火災監視の自動化について検討した結果をまとめたアイダホ国立研究所（INL）の報告書が 2019 年 9 月付で公表された[7]。

本研究は、火災監視員の目視による監視作業を、機械

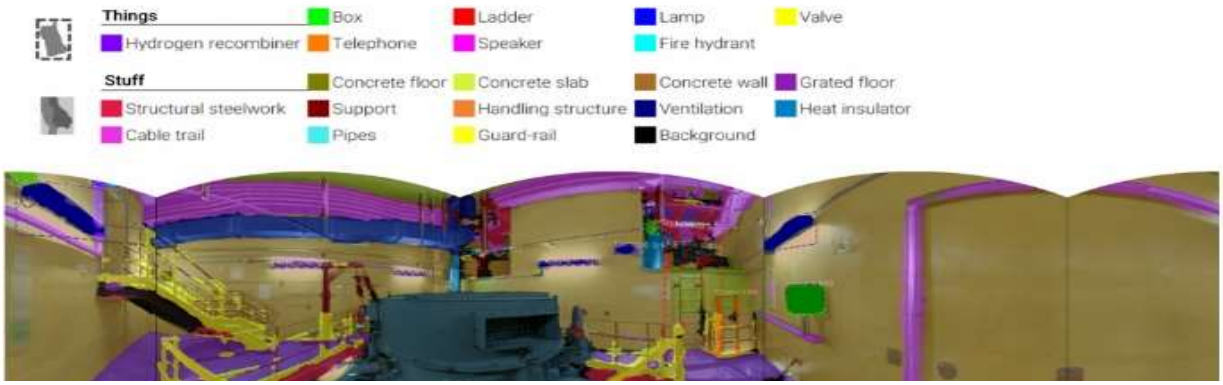

図 3　レーザースキャンによるパノラマ画像の認識

学習を用いて自動化することを目的としている。火災の画像認識のために、複数の機械学習手法を評価し、火災領域の特定においては、長・短期記憶（LSTM）ニューラルネットワークと色特徴抽出の組み合わせが最も正確な結果となった。手法の開発に加えて、産業空間における火災の訓練データセットの整備も行われた。

開発した手法は、YouTube-8M データセットから抽出した 1,000 件の火災動画を用いて、学習および検証した。その後、Yahoo のデータセットから 62 件の動画（火災あり／なしで半々）を用いて試験を実施した。例として図 4 に火災発生時の元画像、図 5 に火災と分類されたピクセルを表した図を示す。開発した手法の精度は、「火災が発生したが検知に失敗（missed positives）」が 0%、「火災が発生してないが検知と反応（false positive）」が 8%であった。今回開発した手法を火災や煙検知技術に統合するには、「火災が発生してないが検知と反応（false positive）」を低減する必要がある。さらに、許認可要求事項への適合のために機械学習手法を用いるには、意思決定の根拠を説明し、人間による火災監視に代替できる能力を本手法が有していると規制側に説明する必要がある。

図 4　火災発生時の元画像

図 5　火災と分類されたピクセル

3.2 原子炉機器の状態と疲労寿命評価（米国）

機械学習と計算力学に基づき、原子炉機器の状態や疲労寿命評価を行うためのフレームワークの検証に関する報告書が、2020 年 9 月付でアルゴンヌ国立研究所（ANL）より公表された[8]。ANL の研究の結果、以下の結論を得た。

(1) 機械学習技術（TensorFlow ライブラリなど）と固体力学ベースのシミュレーションを組み合わせて使用することで、数百回の疲労サイクルに対応した応力-ひずみ曲線と関連する材料パラメータを自動的に推定することが可能である。

(2) 周方向塑性に基づく解析モデルでは、一定振幅荷重下だけでなく、可変振幅荷重下でも周方向応力を予測することが可能である。その結果、従来の引張試験に基づく材料パラメータでは、繰返し荷重下での応力（振幅とヒステリシスな挙動の両方）を誤って予測してしまうことが明らかとなった。

(3) Scikit-learn や Keras ライブラリなどの機械学習技術は、他のセンサー測定値からでは測定不能な時系列センサー信号を正確に予測することができる。試験を実施したさまざまなアプローチの中で、Keras ライブラリと Relu 活性化関数および疲労サイクルの k-mean ベースのクラスタリングを併用することで、非対称疲労荷重および対称疲労荷重の両方で最良の結果が得られた。

(4) Scikit-learn ベースの k-mean クラスタリング技術などは、ひずみの直接制御が不可能な PWR 水力試験システムにおいて、ひずみ振幅とひずみ速度を制御するための疲労試験パラメータの最適化に役立つ。

(5) マルコフ連鎖モンテカルロ法に基づく確率論的アプローチは、確率的疲労状態と寿命の推定に使用することができる。これはモデルと疲労試験に基づくデータの両方に基づいている。

3.3 不確実性の定量化（米国）

Nuclear Engineering and Technology 第 52 巻に、深層学習を用いた原子炉シミュレーションの不確実性の定量化に関するイリノイ大学の研究論文が掲載された[9]。

データハンドリングのグルーピング手法（GMDH）は、最新の深層学習手法の一つと考えられている。本研究では、多層 GMDH ネットワークを用いて、原子炉シミュレーションの不確実性定量化（UQ）と感度分析（SA）を行った。GMDH は、高精度のコンピュータモデルを簡単な代理モデルで置き換えるための手法として利用され、UQ や SA のタスク（分散分解、不確実性伝播など）を容易に実行する。

本研究では、GMDH の性能を、原子炉シミュレーションにおける以下の 2 つの UQ によって検証した。

(1) 低次元の入力（原子炉チャンネル内の二相流）

(2) 高次元の入力（8 群の核反応断面積）

両者とも、GMDH ネットワークは、平均絶対誤差と二乗誤差が小さく、目標とする分散を高い精度で捉えることができ、非常に優れた性能を示した。その後、GMDH を利用して、Sobol 指標を用いた分散分解や、GMDH に基づくサンプル数の多い不確実性伝播などの UQ タスクを実行した。また、GMDH の性能を、ガウス過程や多項式カオス展開を含む他の代理モデルと比較した。比較の結果、GMDH は低次元、高次元の問題ともに信頼できる性能を持つことが明らかになった。

3.4 事故時のアクションの策定（米国）

2019 年の国際学会 NURETH 2019 にて、AI を用いた事故時の意思決定に関する発表をニューメキシコ大学が行った[10]。

事故が発生した場合、プラント運転員は、緊急時の運転手順やシビアアクシデント管理ガイドラインを頼りに判断を下す。しかし、原子力発電所は複雑な動的システム（多くの機器、様々な起因事象、シナリオ、時間依存変数など）であるため、想定される故障とそれに対応する緩和策の数が膨大であり、すべての故障を事前に計画することはできない。このような複雑なシステムに対処するために、本研究では、AI を用いた知識ベース意思決定支援システム（KBDSS）を提案した。

提案されたシステムは、プラントの状態と機器の健全性の継続的なモニタリングを利用して、故障した機器を特定し、故障した動作を緩和するために必要なアクションを自律的に計算することができる。静的および動的なイベントツリー、フォールトツリー、緊急時ガイドラインの代わりに、システムコンフィグレーションに関する知識と原子力発電所のパフォーマンスと安全性を支配する規則を KBDSS の論理ルールとして使用している。

KBDSS を用いた 3 つの事象例（2 次系の弁不作動）に対して必要な計画を自律的に生成するテストに成功した。これはリアルタイムでの原子力発電所管理のための論理プログラミングコードとしては初めてのものである。

本研究では、原子力発電所システムの状態に基づいて事故時のアクションを自律的に生成したが、次のステップでは、最適なプランを見つけるためのアクションのランク付けが必要である。将来的には、発電所の状態が継続的に変化するような、より複雑なシナリオを考慮する必要がある。そのため、意思決定は時間に依存することになる（オンライン意思決定）。また、データの一部が欠落しているような、より現実的な事故シナリオも研究する必要がある。運転員が情報を入力できるような、インタラクティブな意思決定システムも必要である。

４．原子力保全分野への AI 適用に係る規制

米国原子力分野の AI 適用に関連して、米国原子力規制委員会（NRC）が AI 適用のメリットや導入状況についての情報を事業者から募集するとの発表が、2021 年 4 月の米国の官報に掲載された[11]。

NRC は、原子力発電の運転経験やプラント管理において、AI や機械学習（AI/ML）を用いた高度な計算・予測能力の可能性を探っており、一般市民、原子力産業界、その他のステークホルダー、およびその他の関心のある個人や組織からのコメントを要請している。この要請の焦点は、商業用原子力産業界における AI および機械学習の現在の使用状況および将来の動向について、NRC スタッフがよりよく理解できるような情報を収集することである。

NRC は、本募集において以下の項目についてコメントを募集している。

(1) 原子力発電所の設計、運転、保守、廃炉の作業を効率化するための AI/ML ツールの原子力産業界での開発または使用の状況はどうなっているか？どのようなツールが使用または開発されているか？現在開発中のツールはいつ実用化される予定か？

(2) 商業用原子炉の運転・管理のうち、AI/ML の導入により最も恩恵を受ける分野と最も恩恵を受けない分野は何か？考えられる例としては、検査支援、事故対応、発電、サイバーセキュリティ、予防保全、安全・リスク評価、系統や機器の性能監視、運転・保守の効率化、運転停止の管理などが挙げられるが、これらに限定されるものではない。

(3) 商業用原子力発電所の運転における AI/ML を取り入れることによる(a)設計または運転の自動化、(b)予防保全の傾向把握、(c)原子炉運転員の生産性向上などの潜在的なメリットはあるか？

(4) 商業用原子力発電所の管理・運転において、現在使用されている、あるいは近い将来に使用されるであろう

AI/ML 手法は何か？AI/ML 手法の例としては、人工ニューラルネットワーク、決定木、ランダムフォレスト、サポートベクターマシン、クラスタリングアルゴリズム、次元削減アルゴリズム、データマイニングおよびコンテンツ分析ツール、ガウス過程、ベイズ法、自然言語処理、画像のデジタル化などが挙げられるが、これらに限定されるものではない。

(5) 産業界全体を前提とした AI/ML の開発と使用に関するトップダウンな戦略的目標と、ケースバイケースの目標を持ったアプローチとでは、どのようなメリットやデメリットがあるか？

(6) AI/ML に関して、原子力産業界は現在、技術導入のどの段階にあるのか、またその理由は何か？現在の技術導入モデルでは、イノベーション段階、早期採用段階、早期マジョリティ段階、後期マジョリティ段階、停滞段階といったカテゴリーにフェーズを分類している。

(7) AI/ML を業務上の意思決定やワークフロー管理に統合する際に、AI/ML ツールの開発・適用に伴うコストと、プラントの運転・エンジニアリング上のメリットとのバランスをとるためには、どのような課題があるか？

(8) 原子力産業界における AI/ML の専門知識の一般的なレベルはどの程度か（例：エキスパート、熟練者、または初心者）？

(9) AI/ML は、他の発電源と比較した場合の効率、コスト、競争上の位置づけの観点から、原子力産業界にどのような影響を与えるか？

(10) AI/ML は、原子炉オーバーサイトの効率性や有効性を向上させたり、オーバーサイトに関連する規制コストに影響を与えたりする可能性があるか？あるとすれば、どのような形でか？

(11) AI/ML は通常、非常に大量のデータの作成、転送、評価を必要とする。遠隔地のオフサイトネットワークに保存されている原子力発電所固有の運転経験や設計情報について、データセキュリティに関する懸念があるとすれば、それはどのようなものか？

５．AI 適用に関する課題

AI の技術は日進月歩で進化しているが、原子力発電所への導入にあたって以下のような課題が指摘されている[12]。

まず、モデルの解釈性が悪いことが挙げられる。数多くの AI モデルは、エンドツーエンドのアーキテクチャを持つ「ブラックボックス」であり、これらのモデルを説明したり理解したりすることは困難である。例えば、機械学習や深層学習などの手法を用いてプラントの出力レベルを制御している際に過渡状態に陥った場合、データ処理中に何が起こっているのかがわからないため、運転員は混乱する。このような問題は、AI 技術を原子力産業に適用する際の大きな障害となる。多くの研究者がこの問題に取り組んでいるが、その道のりはまだ長い。

次に、モデルの汎用性をさらに高める必要があることが挙げられる。現在の AI モデルの多くは、特定の状況に特化して設計されているが、AI モデルは他の類似した状況に一般化できるようになるべきである。例えば、PWR で AI がうまく機能した場合、そのモデルを高速炉や他の種類の原子炉をベースにしたプラントに一般化できるようになることを期待している。現段階では難しいが、将来的には実用化されるかもしれない。

６．まとめ

本稿では、米国および欧州主要国の原子力保全分野における AI の適用例と開発例、現状の課題について述べた。原子力産業界に関わらず、日本では少子高齢化が進んでおり、労働力を何らかの形で補う必要がある。このような問題を解決する一つの手段が AI である。「AI をどのように適用するか？」が AI を実用化する際の最大の考慮事項であり、AI に詳しい人材と原子力プラントに詳しい人材が密にコミュニケーションをとることで知恵を絞らなければならないと私は考える。本稿がその第一歩になれば幸いである。

参考文献

[1] 総務省、情報通信白書令和元年版（令和元年）
[2] 総務省、情報通信白書平成 28 年版（平成 28 年）
[3] NEI, “Delivering the Nuclear Promise Top Innovative Practice – Process Automation Using Machine Learning (DNP-TIP-2020-09)”, December 2, 2020.
[4] NEI, “Delivering the Nuclear Promise Top Innovative Practice – Callaway Continuous Online Monitoring (DNP-TIP-2020-01)”, October 15, 2020.
[5] A. Nivaggioli, et al. “Using 3D Models to Generate Labels for Panoptic Segmentation of Industrial Scenes”, ISPRS 2019.
[6] EDF, “Bringing chatbots to our business”, March 20, 2018.

https://www.edfenergy.com/for-home/energywise/research-development-chatbots
[7] INL, "Automating Fire Watch in Industrial Environments through Machine Learning-Enabled Visual Monitoring", September 2019.
[8] ANL, "A Hybrid AI/ML and Computational Mechanics Based Approach for Time-Series State and Fatigue Life Estimation of Nuclear Reactor Components", September 2020.
[9] Majdi I. Radaideh, Tomasz Kozlowski, "Analyzing nuclear reactor simulation data and uncertainty with the group method of data handling", Nuclear Engineering and Technology 52 (2020) 287 – 295
[10] Botoros N Hanna et al., "An Artificial Intelligence-Guided Decision Support System for The Nuclear Power Plant Management", Proceedings / 18th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH 2019), August 2019.
[11] Federal Register, "Role of Artificial Intelligence Tools in U.S. Commercial Nuclear Power Operations", Vol. 86, No. 75, April 21, 2021.
[12] Chao Lu, et al., "Nuclear Power Plants with Artificial Intelligence in Industry 4.0 Era: Top-Level Design and Current Applications - A Systemic Review", IEEE Access 2020.